

# 代替ルートの存在下における時間帯別料金制度

## －最適交通量配分理論の応用－

竹内 健蔵

### 1. はじめに

道路特定財源の一般財源化を巡るさまざまな議論の中において、時間帯別に高速道路の料金を変えることの提案が行われ、社会実験などを通じて時間帯別料金制度の適用が全国レベルで進んでいる。この目的は、高速道路の利用率を高めることにより、高速道路を効率的に運用しようということにあり、それによる赤字は自動車関係諸税の税収を主に財源として補填することになっている（平成19年12月7日「道路特定財源の見直しについて」政府・与党合意）。

全国規模で展開されている時間帯別料金制度は、単なる料金値下げであることが多いことから、おおむね利用者から好評を博しているようではあるが、その料金水準の合理性についてはほとんど検討が加えられていない。少なくとも資源配分上の観点からの、現行料金水準の妥当性についてはかなり疑義があるところである。そこで本論においては、最適交通量配分理論を応用することによって、社会的純便益を最大にするための時間帯別料金を定性的に分析し、さらに実際のデータを使ってシミュレーション分析を行い、時間帯別料金水準を算出することを目的とする。

最適交通量配分理論を利用して時間帯別料金について言及したものとして、竹内（2008）がある。この論文では、「抵抗費用」の概念を導入し、この概念を使って各時間帯における交通量を各ルートの交通量と擬似的に見なすことによって、ルート間での交通量配分理論を時間帯別での交通量配分に適用している。本論においても抵抗費用の概念を利用するが、本論は以下の3点において竹内（2008）と異なっている。第1に、竹内（2008）においては、抵抗費用を消費者の合理的な行動を実現するための目的関数に含めておらず、いわば外生的な取り扱いをし

ていた。そのため、シミュレーション分析（1 ルートのみ）においての最適料金が抵抗費用の大きさにそのまま依存するという欠点があった。本論ではこの抵抗費用を内生的に取り扱う。すなわち、抵抗費用を目的関数に取り込むことによってモデルをより合理的な消費者行動に近づける<sup>1</sup>。第2に、竹内(2008)においては、どの時間帯を走行する利用者也自身の持つ時間価値を一定としたが、それは現実的なものであるとはいえないであろう。同じ利用者であっても、おそらくピーク時は時間価値が高く、オフ・ピーク時には時間価値が低いであろうということが考えられる。そのため、本論では時間価値が時間帯によって異なる場合のシミュレーション分析を試みた。第3に、1 ルートのみにおけるシミュレーションを行っていた竹内(2008)を、同一 OD 間に  $n$  個のルートがある場合のネットワークに一般化して定性的な結論を得、さらにそれに基づいて実際のネットワークのデータを用いたシミュレーション分析を行い、料金水準を算出した。

本論の構成は以下の通りである。2. においては最適交通量配分理論を概説し、それをどのように時間帯別の交通量配分に転換するのかについて述べる。3. においては、竹内(2008)のモデルを複数ルートに拡張した場合のモデルを構築し、複数ルートにおけるルート間交通量配分と時間帯別交通量配分を同時決定するモデルにより、各ルート各時間帯の最適な道路料金を定性的に導出する。4. においては、時間価値を時間帯ごとに異なるように設定するモデルを提示し、時間価値一定の場合とどれだけ最適道路料金が異なるのかについて、1 ルートの場合を使ってシミュレーション分析を行う。5. においては、3. のモデルを受けて、首都高速道路横羽線と湾岸線の時間帯別料金を実際のデータを用いることによって導出する。6. においては、これまでの分析をまとめ、今後の課題を整理する。

## 2. 最適交通量配分理論の応用

最適交通量配分理論（利用者均衡配分モデル）において最も重要な定理は「Wardrop の原理」であろう<sup>2</sup>。ある OD 間に複数のルートがあり、その OD 間

---

<sup>1</sup> このモデル構築に当たってはこのモデルの現況再現性が問題になるであろう。紙幅の関係上、本論では省略したが、1 ルートの場合については竹内（近刊）を参照されたい。また抵抗費用の内生化については、京都大学大学院経済学研究科の文世一先生よりヒントをいただいた。ここに感謝申し上げたい。

<sup>2</sup> Wardrop (1952) pp.344-346.

に一定の交通需要が存在するとき、次のような原理が成立し、そのように交通量は配分される。

「利用される経路（ルート）の旅行時間はみな等しく、利用されない経路（ルート）の旅行時間よりも小さいか、せいぜい等しい。」

この原理を「Wardrop の第 1 原理」と呼ぶ<sup>3</sup>。この原理が成立するためには、  
(1) すべての利用者はつねに旅行時間を最小とするように行動する  
(2) 利用者はつねに利用可能な経路についての完全な情報を得ている  
という 2 つの条件が仮定されている。

Wardrop は上記のように旅行時間によってこの原理を表わしたが、言うまでもなく、この原理は一般化費用に関しても当てはまる。たとえば旅行時間は時間価値を乗ずることによって時間費用となり、高速道路利用料金という金銭費用や、ガソリン代などの走行費用と合計することで一般化費用が計算される。つまり、利用者数が均衡状態にあれば、それぞれのルートにおいて一般化費用は相互に等しい。

交通工学などで考えられるこうした交通ネットワークは、物理的に複数存在するルートを想定している。しかしながら、同一路路上のピーク時の交通とオフ・ピーク時の交通を仮想的に 2 つのルートと考え、道路利用者はそのどちらかの時間帯の走行を選択すると考えることも可能であろう。言い換えれば、利用者はピーク時というルートの走行とオフ・ピーク時というルートの走行の 2 つの選択肢が与えられているということである。この場合、両者に関する需要は完全に代替的であると考えることができる。

道路利用者は本源的需要の性格（たとえば職場での労働や学校での学習）から、派生需要としての交通需要に関して、通常ピーク時の通行を好み、オフ・ピーク時の走行を好ましく思わない、と考えることは自然であろう。このことは、別の見方をすれば、ピーク時の道路利用者にはオフ・ピーク時の道路利用に何らかの抵抗が働いていると考えることができる。これを「抵抗費用」と呼ぶことにする。抵抗費用としては、深夜や早朝に夜更かしや早起きをして運転をしたくない、という抵抗感や、ピーク時前に運転して目的場所（たとえば勤務地）に早着することによって無駄な時間を使うという機会費用、あるいはピーク時後に運転して目的場所（たとえば勤務地）に遅刻することによって負担しなくてはならない機会

---

<sup>3</sup> Wardrop の第 2 原理も存在するが、本論との直接的な関係はないのでここでは省略している。

費用などが考えられる（これらを変数化したのが ADL モデルである）<sup>4</sup>。ピーク時の利用者は、ピーク時の利用による自己の効用が抵抗費用を上回っているからピーク時を利用しているということが言える。この意味において、抵抗費用はもっとも単純な顕示選好に基づく時間価値の推定と類似している。なお容易に類推されるように、同一のルートを時間帯ごとに2つのルートとして取り扱うのであるから、いかなる時間帯であろうとも当該道路の交通容量、言い換えれば QV 式は同一である。

以下で分析するモデルでは、この抵抗費用が中心的な役割を果たす。分析をわかりやすくするために、一般化費用は走行時間に代表される時間費用と、高速道路料金に代表される金銭費用の2つから構成されると考え、燃料費用や車両の減価償却費用等は考えないことにする<sup>5</sup>。

### 3. モデル

ある時間帯  $i$  にあるルート  $j$  を走行する車両の台数を  $N_{ij}$  とする。ただし、 $i=1, \dots, n$  であり、 $j=1, \dots, m$  である。また時間帯  $i$  においてルート  $j$  を走行するときのこの車両の時間費用関数を  $t_j(N_{ij})$  とする。混雑によって時間費用は増加するので、この時間費用関数は走行台数に関して増加関数である。言うまでもなく、同一ルートにおいてはいかなる時間帯の走行においても QV 式は同じであるから、関数  $t$  の添え字には  $i$  が付されていない。そして時間帯  $i$  においてルート  $j$  を走行する車両に課される高速道路料金を  $f^j$  とする。各時間帯における当該 OD 間の道路への需要は完全に代替的であるので、この高速道路ネットワークにはただ1つの逆需要曲線が対応し、それを  $D(N)$  とする。ここで  $N$  は全ルート、全時間帯の総走行台数である。つまり、

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m N_{ij} = N$$

$D(N)$  はまた、道路利用者の当該 OD 間をトリップすることに関する限界便益

<sup>4</sup> ADL モデルとは Arnott, R. A., A. de Palma and R. Lindsey らによる一連の著作の総称である。これらの著作はかなりの数に上るが、代表的なものとして、ADL(1990) と、その適切な解説として田淵 (2001) を挙げておく。

<sup>5</sup> また、車種による区分も重要であるが、たとえば首都高速道路における大型車は普通車に比べて走行台数が10分の1以下であるのでここでは無視することとし、普通車1車種のみとして取り扱うことにする。

であることにも注意しよう。道路利用者は自己の一般化費用を自己のトリップに関する限界便益と等しくするように行動するから、

$$D(N) = t_j(N_{ij}) + f^{ij} + r_{ij} \quad (i = 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, m)$$

が成り立っている。ここで  $r_{ij}$  はある時間帯  $i$  にあるルート  $j$  を走行する道路利用者の抵抗費用である。つまり、道路利用者は自己の負担する時間費用、金銭的費用（料金）、抵抗費用の合計が自己の限界便益と等しくなるように行動することが彼（女）自身にとって最適である。異なる時間帯  $u, v$  ( $u \neq v$ ) において異なるルート  $a, b$  ( $a \neq b$ ) を走行する道路利用者に関して上記の式がそれぞれ成立することになるが、各式において左辺の  $D(N)$  を消去すると、

$$t_a(N_{ua}) + f^{ua} + r_{ua} = t_b(N_{vb}) + f^{vb} + r_{vb} \quad (a \neq b, \quad u \neq v)$$

となる。このことから両者の一般化費用は等しく、これゆえ Wardrop の第 1 原理が成立していることがわかる。

次に高速道路は償還主義の原則に基づいているので、道路利用に関する総収入で総費用を賄わなくてはならない。当該高速道路路線が、償還主義の原則のためにある一定の収入  $R$  を上げなくてはならないことが求められているとすれば、

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m N_{ij} f^{ij} = R$$

が成立していなくてはならない。

さて、いま政策当局が社会的純便益の最大化を目的として時間帯別道路料金制度の導入を決定したとしよう。このとき、社会的純便益は逆需要曲線の積分値から各時間帯における総時間費用と抵抗費用の合計を引いたものと定義される。すなわち、

$$\int_0^N D(n) dn - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m N_{ij} t_j(N_{ij}) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m N_{ij} r_{ij}$$

である。以上のことから次のような制約条件つき極値問題を得る。

$$\begin{aligned} \max \quad & \int_0^N D(n) dn - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m N_{ij} t_j(N_{ij}) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m N_{ij} r_{ij} \\ \text{s.t.} \quad & D(N) = t_j(N_{ij}) + f^{ij} + r_{ij} \quad (i = 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, m) \end{aligned}$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m N_{ij} f^{ij} = R$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m N_{ij} = N$$

ここで変数は  $N_{ij}$ 、 $f^{ij}$ 、 $N$  の  $(2(m \times n) + 1)$  個である。ラグランジュ関数は次のようになる。

$$L = \int_0^N D(n)dn - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m N_{ij} t_j(N_{ij}) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m N_{ij} r_{ij} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \lambda_{ij} [D(N) - t_j(N_{ij}) - f^{ij} - r_{ij}]$$

$$+ \mu \left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m N_{ij} f^{ij} - R \right) + \delta \left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m N_{ij} - N \right)$$

$\lambda_{ij}$ 、 $\mu$ 、 $\delta$  はラグランジュの未定乗数である。1 階の条件は、

$$\frac{\partial L}{\partial N_{ij}} = -t_j(N_{ij}) - N_{ij} t'_j(N_{ij}) - r_{ij} - \lambda_{ij} t'_j(N_{ij}) + \mu f^{ij} + \delta = 0 \quad (i=1, \dots, n, \quad j=1, \dots, m)$$
(1)

$$\frac{\partial L}{\partial N} = D(N) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \lambda_{ij} D'(N) - \delta = 0$$
(2)

$$\frac{\partial L}{\partial f^{ij}} = -\lambda_{ij} + \mu N_{ij} = 0 \quad (i=1, \dots, n, \quad j=1, \dots, m)$$
(3)

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_{ij}} = D(N) - t_j(N_{ij}) - f^{ij} - r_{ij} = 0 \quad (i=1, \dots, n, \quad j=1, \dots, m)$$
(4)

$$\frac{\partial L}{\partial \mu} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m N_{ij} f^{ij} - R = 0$$
(5)

$$\frac{\partial L}{\partial \delta} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m N_{ij} - N = 0$$
(6)

となる。(1)に(4)を代入して  $t_j(N_{ij})$  を消去し、(3)を代入して  $\lambda_{ij}$  を消去する。このようにして任意の時間帯  $i$  におけるルート  $a$ 、 $b$  について、次の関係式を得る。

$$-D(N) + (\mu + 1)f^{ia} - (\mu + 1)N_{ia}t'_a(N_{ia}) + \delta = 0$$
(7)

$$-D(N) + (\mu + 1)f^{ib} - (\mu + 1)N_{ib}t'_b(N_{ib}) + \delta = 0$$
(8)

(7)から(8)を引き、整理すると、

$$f^{ia} - f^{ib} = N_{ia}^* t'_a(N_{ia}^*) - N_{ib}^* t'_b(N_{ib}^*) \quad (i=1, \dots, n \quad a \neq b) \quad (9)$$

が成立する。なお、 $\mu+1=0$  ならば  $N=0$  となる。

一方、(9)に(5)を代入して変形すると、

$$f^{ia} = \frac{N_{ib}^*}{N_{ia}^* + N_{ib}^*} [N_{ia}^* t'_a(N_{ia}^*) - N_{ib}^* t'_b(N_{ib}^*)] + \frac{R - \sum_{k \neq i} \sum_{j \neq a, b} N_{kj} f^{kj}}{N_{ia}^* + N_{ib}^*} \quad (10)$$

$$f^{ib} = \frac{N_{ia}^*}{N_{ia}^* + N_{ib}^*} [N_{ib}^* t'_b(N_{ib}^*) - N_{ia}^* t'_a(N_{ia}^*)] + \frac{R - \sum_{k \neq i} \sum_{j \neq a, b} N_{kj} f^{kj}}{N_{ia}^* + N_{ib}^*} \quad (11)$$

(10)と(11)において、 $N_{ia}^*$ 、 $N_{ib}^*$  はそれぞれ、社会的純便益が最大のときの、任意の時間帯  $i$  におけるルート  $a$ 、 $b$  の最適走行台数である。

なお、任意のルート  $j$  における時間帯  $u$ 、 $v$  についても上記と同じようにして導出され、次の関係式を得る。

$$f^{uj} = \frac{N_{vj}^*}{N_{uj}^* + N_{vj}^*} [N_{uj}^* t'_j(N_{uj}^*) - N_{vj}^* t'_j(N_{vj}^*)] + \frac{R - \sum_{i \neq u, v} \sum_{k \neq j} N_{ik} f^{ik}}{N_{uj}^* + N_{vj}^*} \quad (12)$$

$$f^{vj} = \frac{N_{uj}^*}{N_{uj}^* + N_{vj}^*} [N_{vj}^* t'_j(N_{vj}^*) - N_{uj}^* t'_j(N_{uj}^*)] + \frac{R - \sum_{i \neq u, v} \sum_{k \neq j} N_{ik} f^{ik}}{N_{uj}^* + N_{vj}^*} \quad (13)$$

(12)と(13)において、 $N_{uj}^*$ 、 $N_{vj}^*$  はそれぞれ、社会的純便益が最大のときの、任意のルート  $j$  における時間帯  $u$ 、 $v$  の最適走行台数である。

## 4. 時間価値の変化

竹内（2008）においては、時間価値を一定として単一ルートのシミュレーション分析を行っているし、竹内（2006）においても複数ルートのネットワークにおける最適道路料金水準を求めるときに時間価値を一定としている。しかし、異なる個人はもちろんのこととして、同一の個人であっても走行する時間帯によってその時間価値が異なることは容易に想像される。大抵の人が日々の生活で実感していることであろうが、朝夕のピーク時には1分、1秒が貴重で、時間価値が大変高いであろうと思われる一方で、深夜などのオフ・ピーク時ではそれほど急ぐ

必要もなく、時間価値はかなり低いであろうことが想像される。時間価値一定という仮定を外している先行研究も多く存在する。たとえば、Niskanen (1987)、Mayet and Hansen (2000)、Verhoef and Small (2004) などがある。

わが国では道路に関する費用便益分析マニュアルにおいて時間価値が求められており、この数値に従って道路利用の便益が算定されている。その時間価値は表1の通りである。

表1 車種別の時間価値原単位

車種	時間価値原単位 (円/分・台) 平成15年価格
乗用車	62.86
バス	519.74
乗用車類	72.45
小型貨物車	56.81
普通貨物車	87.44

(出典) 国土交通省道路局『費用便益分析マニュアル』

本論においては、このうち乗用車の62.86円/分・台という数値を基準として、以下のように時間価値が利用者において連続的に分布していると仮定する。なお、モデルケースとして取り上げるのは、首都高速3号渋谷線上りのデータで、2004年11月のものである<sup>6</sup>。

首都高速3号渋谷線上り線の各時間帯の所要時間をサンプルとして、平均値 $\mu$ と標準偏差 $\sigma$ を求める。平均値( $\mu=1069$ 秒)における時間価値を表1の乗用車の平均時間価値62.86円/分・台に合わせ、時間価値が正規分布していると仮定する。最小所要時間(603秒)のときを $\mu-2\sigma$ とし、最大所要時間(1635秒)のときを

<sup>6</sup> 現在ではさらに新しいデータが利用可能であるが、現在はさまざまな割引料金が実施されており、データとしては利用者行動を正確に反映したものとはいえない。この当時はまだ割引料金制度が複雑になる前の時期のデータであるため信頼性が高いと考えられる。このため若干古いがこのデータを利用している。データの提供に当たっては6.における分析データも含めて首都高速道路公団(当時)にご厚意を得た。この場をお借りしてお礼申し上げたい。なお、首都高速道路公団によれば、年間で最もデータが安定するのは通常10月期のデータとのことであるが、2004年は台風等の自然災害が多く、天候不順のため10月期のデータが荒れており、そのため11月のデータの提供を受けた。



$\mu + 2\sigma$ として、時間価値の分布を求めると、最小値で3.18円/分・台となり、最大値で136.6円/分・台となる。以上を図によって示したものが図1である。

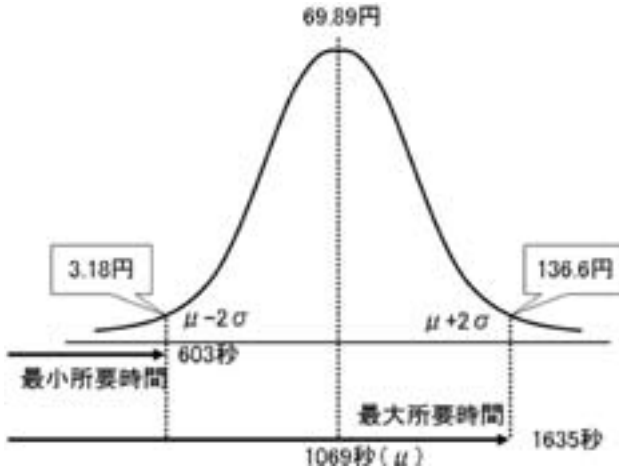


図1 首都高速3号渋谷線上りの時間価値の分布

ここでは煩雑さを避けるために、1ルートのみ（3号渋谷線上り）のデータを利用するので、3.で述べた最適道路料金の式(12)(13)は単一ルートでは、

$$f^u = \frac{N_v^*}{N_u^* + N_v^*} [N_u^* t'(N_u^*) - N_v^* t'(N_v^*)] + \frac{R - \sum_{i \neq u, v}^n N_i f^i}{N_u^* + N_v^*} \quad (14)$$

$$f^v = \frac{N_u^*}{N_u^* + N_v^*} [N_v^* t'(N_v^*) - N_u^* t'(N_u^*)] + \frac{R - \sum_{i \neq u, v}^n N_i f^i}{N_u^* + N_v^*} \quad (15)$$

となる。これを基に時間価値が一定の場合と、時間価値を変化させた場合の首都高速3号渋谷線上りの時間帯別料金水準の変化が図2において示されている<sup>7</sup>。このことからわかるように、時間価値を変化させた方が時間帯別料金水準の変動が激しい。なお、時間価値一定の場合と時間価値変化の場合の社会的総費用は、それぞれ、101,030,514.05円と、148,211,181.84円となる。

<sup>7</sup> シミュレーションの手法については後述の5.と同じである。より詳細なデータについては竹内（近刊）を参照のこと。

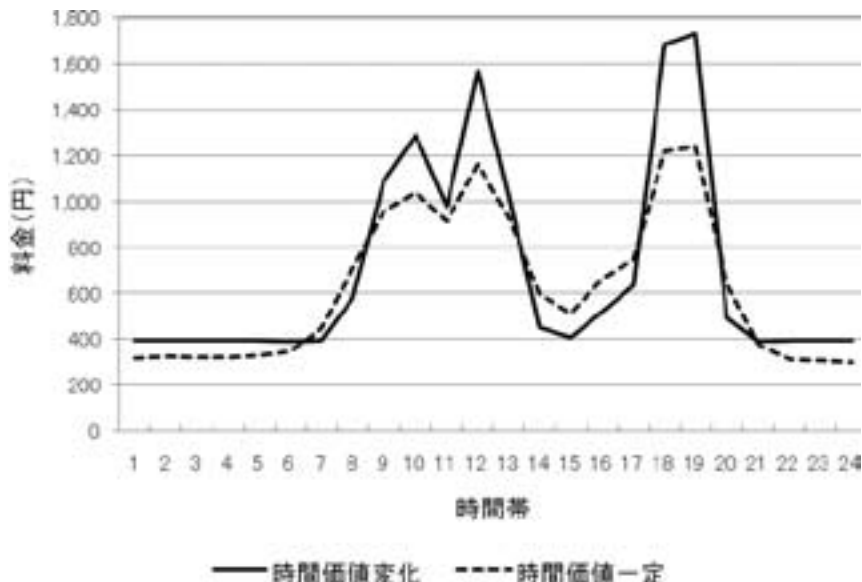


図2 時間価値の相違による時間帯別料金水準の比較（3号渋谷線上り）

## 5. シミュレーション分析

3.において  $n$  個の時間帯と  $m$  本のルートにおける最適な時間帯別料金が定性的に導出された。ここでは1日を24個の時間帯に区切り（ $n=24$ ）、首都高速神奈川線でネットワークを構成する横羽線上りと湾岸線東行きの2つのルート（ $m=2$ ）における時間帯別料金を実際のデータを用いることによって導出する<sup>8</sup>。ここでのOD区間は竹内（2006）と同様に、横羽線上り（添え字  $a$  で表す）では生麦JCTから大師JCTまで、湾岸線東行き（添え字  $b$  で表す）では大黒JCTから浮島JCTまでとする。使用データは3.と同様に首都高速道路公団（当時）2004年11月のデータに基づいた。なお、時間価値に関しては表1の乗用車の数値をそのまま採用し、時間価値は一定と仮定する。

次に、当該OD間における一般化費用に関する需要曲線が推定されなくては

<sup>8</sup> 当該区間には並行して第1、第2京浜国道と県道の東京大師横浜線が存在するが、ここでは捨象している。時間帯別料金ではないが一般国道をネットワークに組み込んだときの最適料金については竹内（2006）を参照のこと。

ならない。しかし一般化費用に関する需要曲線の推定はきわめて難しく、それだけで一つの研究ができるくらいの分析上の困難がある。また需要曲線の推定を誤ると、それを原因としてシミュレーションの意義が失われる可能性もなしとはしない。そこで本シミュレーションでは、あえて総走行台数に変化はない、つまり、需要は完全に非弾力的であることを仮定した。しかし、見方を変えれば、このことは本論の目的に沿うものでもある。なぜならば、時間帯別料金制度は基本的にピーク時の需要をオフ・ピーク時の需要に転換させることが目的であるから、転換交通のみを対象とすることはそれほど現実性を失わせるものとは思われないからである。需要が完全に非弾力的であると仮定されるので、目的関数は社会的純便益の最大化ではなく、社会的総費用の最小化となるが、それによってモデルの一般性が失われないことは明らかである。

各路線における QV 式は求められているので、それと当該区間の距離から、以下のように時間費用曲線を求めることができる。

横羽線上り（生麦 JCT・大師 JCT 間9.1km）

$$t_a = \frac{50050}{-3N_a + 330000}$$

湾岸線東行き（大黒 JCT・浮島 JCT 間10.0km）

$$t_b = \frac{75000}{-4N_b + 600000}$$

また、収入制約に関しては、神奈川線における 1 日当り計画収入を 2 で割り、それを片道の計画収入とし、神奈川線全体の 1 日当り片道交通量に占める横羽線上り、湾岸線東行きの交通量の割合を乗じて求める。その結果、収入制約は 47,387,774.53円 / 日となった。

当該区間内の総走行台数は、各料金所間における走行台数のデータを平均して求め、当該区間全体について 81,984.75 台 / 日を得た。抵抗費用に関しては、既に各時間帯に所要時間が実測データとして存在するので、当該区間の所要時間に時間価値を乗じて各時間帯の時間費用を導出し、そのなかの最大値から各時間帯における時間費用を差し引いて抵抗費用とした<sup>9</sup>。以上をまとめると、以下の制約条件付き極値問題を解けばよいことになる。

<sup>9</sup> 抵抗費用は一般化費用から求めるべきであるが、導出された時間費用に定額の高速度道路料金を加えて、再び定額の高速度道路料金を差し引くことになるので、結果は同じである。したがって、ここでは高速度道路料金を入れずに考えている。

$$\begin{aligned}
\min \quad & \sum_{i=1}^{24} N_{ia} \frac{69.89 \times 60 \times 50050}{-3N_{ia} \times 24 + 330000} + \sum_{i=1}^{24} \frac{69.89 \times 60 \times 75000}{-4N_{ib} \times 24 + 600000} + \sum_{j=a,b} \sum_{i=1}^{24} N_{ij} r_{ij} \\
s.t. \quad & \frac{69.89 \times 60 \times 50050}{-3N_{ua} \times 24 + 330000} + f^{ua} + r_{ua} = \frac{69.89 \times 60 \times 50050}{-3N_{va} \times 24 + 330000} + f^{va} + r_{va} \quad (u \neq v) \\
& \frac{69.89 \times 60 \times 75000}{-4N_{ub} \times 24 + 600000} + f^{ub} + r_{ub} = \frac{69.89 \times 60 \times 75000}{-4N_{vb} \times 24 + 600000} + f^{vb} + r_{vb} \quad (u \neq v) \\
& \frac{69.89 \times 60 \times 50050}{-3N_{ua} \times 24 + 330000} + f^{ua} + r_{ua} = \frac{69.89 \times 60 \times 75000}{-4N_{vb} \times 24 + 600000} + f^{vb} + r_{vb} \quad (a \neq b, u \neq v) \\
& \sum_{j=a,b} \sum_{i=1}^{24} N_{ij} f^{ij} = 47387774.53 \\
& \sum_{j=a,b} \sum_{i=1}^{24} N_{ij} = 81984.75
\end{aligned}$$

これらを解くことによって表 2 ab を得る<sup>10</sup>。

表 2 a 横羽線上り時間帯別料金水準

時間帯	料金 (円)	交通量 (台/時)	抵抗費用 (円)	時間帯	料金 (円)	交通量 (台/時)	抵抗費用 (円)
0.00-1.00	574.44	1,491.45	295.86	12.00-13.00	656.40	1,624.65	173.56
1.00-2.00	575.98	1,494.16	293.53	13.00-14.00	658.77	1,628.21	170.06
2.00-3.00	577.53	1,496.86	291.21	14.00-15.00	690.46	1,674.44	123.47
3.00-4.00	580.62	1,502.24	286.55	15.00-16.00	680.92	1,660.80	137.45
4.00-5.00	584.49	1,508.93	280.72	16.00-17.00	644.58	1,606.68	191.03
5.00-6.00	587.58	1,514.24	276.06	17.00-18.00	676.96	1,655.06	143.27
6.00-7.00	627.32	1,579.70	216.66	18.00-19.00	629.67	1,583.42	213.16
7.00-8.00	775.51	1,787.20	0.00	19.00-20.00	596.12	1,528.72	263.25
8.00-9.00	723.98	1,720.73	74.55	20.00-21.00	585.26	1,510.26	279.56
9.00-10.00	669.83	1,644.64	153.75	21.00-22.00	581.39	1,503.58	285.38
10.00-11.00	695.23	1,681.19	116.48	22.00-23.00	581.39	1,503.58	285.38
11.00-12.00	676.95	1,655.10	143.27	23.00-24.00	579.07	1,499.55	288.88

社会的総費用 42,993,432.37 円 / 日

表 2b 湾岸線東行き時間帯別料金水準

時間帯	料金 (円)	交通量 (台/時)	抵抗費用 (円)	時間帯	料金 (円)	交通量 (台/時)	抵抗費用 (円)
0.00-1.00	529.35	1,836.21	306.35	12.00-13.00	524.83	1,824.46	313.34
1.00-2.00	527.09	1,830.36	309.84	13.00-14.00	525.59	1,826.43	312.17
2.00-3.00	531.61	1,842.05	302.85	14.00-15.00	530.11	1,838.16	305.18
3.00-4.00	534.63	1,849.81	298.19	15.00-16.00	528.60	1,834.26	307.51
4.00-5.00	532.37	1,843.99	301.69	16.00-17.00	524.83	1,824.47	313.34
5.00-6.00	527.09	1,830.36	309.84	17.00-18.00	527.09	1,830.35	309.84
6.00-7.00	521.83	1,816.57	318.00	18.00-19.00	524.83	1,824.47	313.34
7.00-8.00	525.59	1,826.43	312.17	19.00-20.00	521.07	1,814.60	319.16
8.00-9.00	522.58	1,818.56	316.83	20.00-21.00	519.57	1,810.64	321.49
9.00-10.00	534.63	1,849.80	298.19	21.00-22.00	522.58	1,818.55	316.83
10.00-11.00	533.88	1,847.87	299.36	22.00-23.00	525.60	1,826.38	312.17
11.00-12.00	530.86	1,840.10	304.02	23.00-24.00	524.84	1,824.44	313.34

社会的総費用 54,442,406.68 円 / 日

表 2 ab の時間帯別料金をグラフに表したものが図 3 である。これを見てわかることは、横羽線の料金が574円から776円まで時間帯によっては大幅に変化するのに対して、湾岸線の料金はどの時間帯でも500円から550円の間にとまっており、その変化は小さい。これは横羽線の道路が狭小でしかも混雑が激しいのに対して、湾岸線の道路容量が大きく、しかもそれほど混雑をしていないことが原因であると考えられる。次に、このような時間帯別料金を課すことによって各時間帯の交通量がどのように変化するかを示したものが図 4 ab である。これを見ると分かるように、両ルートにおいて交通量が各時間帯において平準化されていることが分かる。それでもなお、横羽線の方が湾岸線よりも時間帯による交通量の変動が若干見られる。しかしながら、定性的モデルが示しているように、この場合、社会的総費用は最小になっている。

<sup>10</sup> 計算は EXCEL を使い、準ニュートン法によって求めた。

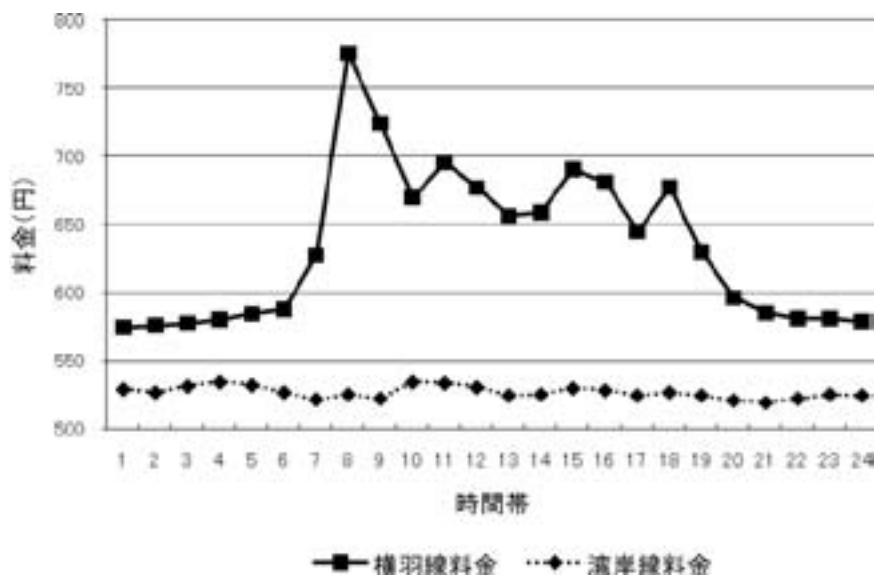


図3 横羽線上りと湾岸線東行きの時間帯別料金水準

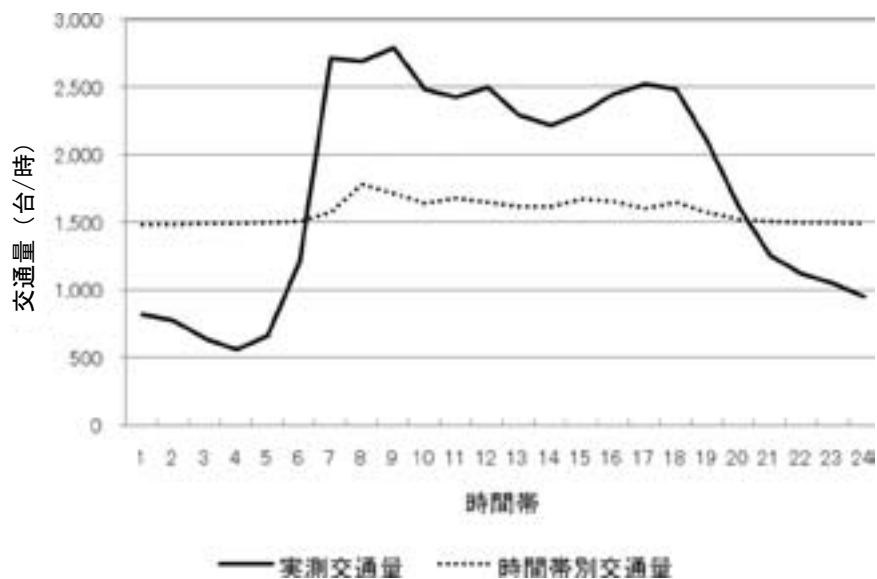


図4a 時間帯別料金による横羽線上りの交通量の変化

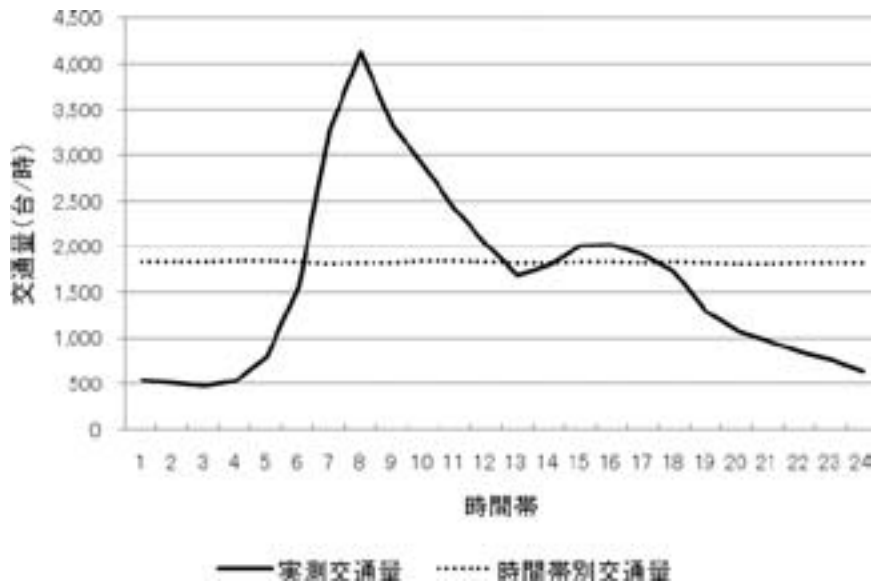


図4b 時間帯別料金による湾岸線東行きの交通量の変化

## 6. まとめと今後の課題

本論においては、最適交通量配分の理論、特に Wardrop の原理を時間帯別料金に応用することによって、社会的純便益を最大にする時間帯別料金を定性的に求め、次に首都高速道路のデータを利用してシミュレーション分析を行い、実際の時間帯別料金水準を定量的に導出した。特に本論では、次の3点において従来の研究を発展させた。第1に、竹内（2008）においては抵抗費用がモデルにおいて外生的に処理されていたのに対して、本論では抵抗費用をモデルに内生的に組み込むことによって、より現実的な対応を行うことができた。第2に、時間帯別料金モデルに限らず、最適料金導出に関するモデルでは時間価値を一定と仮定することが多いが、本論では、道路利用者の時間価値が正規分布に従うと仮定し、時間帯別料金が異なるという前提の下にシミュレーション分析を行った。そして首都高速3号渋谷線上のデータを基に、時間価値一定の場合と時間価値が異なる場合の最適料金の比較を行った。第3に、最適交通量配分の理論を時間帯別料金に応用するだけでなく、従来のルート間配分にも同時に適用して、ある OD

間で複数ルートが存在する場合の最適な時間帯別料金を定性的に求め、さらに2路線24時間区分で、首都高速神奈川線の横羽線上りと湾岸線東行きのデータを用いて最適な時間帯別料金水準を定量的に導出した。

このように本論は竹内 (2008) を複数の観点から拡張したものとなっているが、依然残された問題点は存在する。第1に、シミュレーション分析において、分析の正確性を期すために、あえて不確実性の大きくなる需要曲線の導出を避け、転換交通のみが存在するという仮定の下に料金水準を定量的に導出している。そのために、理論的には同値ではあるものの、社会的総費用の最小化が目的とされ、社会的純便益を計測することができなかった。今後は需要曲線の導出に基づく定量的な分析が必要である。第2に、本論で対象としたのは乗用車であって、車種間における料金水準の違いは捨象されている。本論で用いた路線では乗用車の比率が高いとしても、貨物車の動向を無視することはできず、今後は車種間の料金水準の違いについても考察するべきであろう。第3に、本論で導出したモデルは時間帯別に抵抗費用が独立して導出されているが、待ち行列が時間帯にまたがって存在することを考えると、現実的であるという点では動学的な分析に劣る。本モデルの簡便性については一定の評価はできようが、従来のADLモデルから本論のモデルがどのような示唆を得ることができるかについても考察する必要があるものと思われる。

#### <参考文献>

- Arnott, R. A., A. de Palma and R. Lindsey (1990), "Economics of Bottleneck," *Journal of Urban Economics*, Vol.27, No.1, pp.111-130.
- Mayet, J. and M. Hansen (2000), "Congestion Pricing with Continuously Distributed Value of Times," *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol.34, No.3, pp.359-370.
- Niskanen, E. (1987), "Congestion Tolls and Consumer Welfare," *Transportation Research*, Vol.2B, No.2, pp.171-174.
- 田淵隆俊 (2001)、「ボトルネック混雑の経済学」、山田浩之編、『交通混雑の経済分析』、第9章、165-175頁。
- 竹内健蔵 (2006)、『都市交通ネットワークの経済分析』、有斐閣。
- 竹内健蔵 (2008)、「交通ネットワーク理論を応用した時間帯別道路料金：抵抗費用概念の導入」、『高速道路と自動車』、第51巻、第1号、21-27頁。



- 竹内健蔵（近刊）、「交通量配分理論を応用した時間帯別道路料金の導出と計測」、道路経済研究所。
- Verhoef, E. T. and K. A. Small (2004), “Product Differentiation on Roads: Constrained Congestion Pricing with Heterogeneous Users,” *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol.38, No.1, pp.127-156.
- Wardrop, B. A. (1952), “Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research,” *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, No.36, pp.325-378.